

LNG 병커링 바지의 정수 중 예인안정성에 관한 수치연구

† 오승훈 · 정동호* · 정재환* · 황성철* · 조석규* · 성홍근*

*,† 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Numerical Study on Towing Stability of LNG Bunkering Barge in Calm Water

† Seunghoon Oh · Dongho Jung* · Jae-Hwan Jung* · Sung-Chul Hwang* · Seok-kyu Cho* · Hong Gun Sung*

†, * Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

요 약 : 본 논문에서는 LNG 병커링 바지에 대한 예인안정성을 평가하였다. 친환경 에너지원인 LNG(액화천연가스)의 전환을 위한 인프라로 LNG 병커링 바지가 개발되고 있다. LNG 병커링 바지는 예인줄에 연결되어 이동하는 부선의 형태이기때문에 LNG 병커링 바지의 예인안정성의 확보는 LNG 병커링 바지 뿐만아니라 주변 항해 선박의 안전을 위해 매우 중요하다. LNG 병커링 바지의 예인안정성을 초기 설계단계에서 추정하기 위해서 예인시물레이션을 위한 수치코드를 개발하였다. 초기설계단계에서 활용 가능하도록 운동방정식에는 조종수학그룹(MMG)모델이 적용되었고 조종미계수에는 경험식이 적용되었다. 개발된 수치코드의 유효성을 확인하기 위해 발표된 계산 및 모형시험의 결과와 비교하였다. 개발된 수치코드를 이용하여 LNG 병커링 바지의 선미 스키프 유무에 따른 예인시물레이션을 수행하였다. 수행된 시물레이션을 통해 설계된 선미 스키프 면적의 적정성을 확인하였다.

핵심용어 : 액화천연가스 병커링 바지, 예인 안정성, 조종수학모델, 조종 미계수, 선미 스키프

Abstract : In this paper, the towing stability of the LNG bunker barge is estimated. Currently, LNG bunkering barge is being developed as an infrastructure for the bunkering of LNG (Liquefied Natural Gas), an eco-friendly energy source. Since the LNG bunker barge are in the form of towed ship connected to the tow line, the towing stability of the LNG bunker barge is very important for the safety of not only the LNG bunker barge but also the surrounding sailing vessels. The numerical code for towing simulation was developed to estimate the towing stability of the LNG bunker barge at the initial design stage. The MMG(Manoeuvring Mathematical Group) model was applied to the equations of motion and the empirical formula was applied to the maneuvering coefficients so that they could be used in the initial design stage. To validity of the developed numerical code, it was compared with published calculation and model test results. Towing simulations were carried out according to with and without stern skeg of the LNG bunker barge using the developed numerical code. Through the results of the simulations, the appropriateness of the stern skeg area designed was confirmed.

Key words : LNG Bunkering Barge, Towing Stability, MMG Model, Manoeuvring Coefficients, Stern Skeg

1. 서 론

본 논문에서는 LNG 병커링 바지에 대한 예인안정성을 평가하였다. 친환경 에너지원인 LNG(액화천연가스)의 전환을 위한 인프라로 LNG 병커링 바지가 개발되고 있다. LNG 병커링 바지의 예인안정성을 초기 설계단계에서 추정하기 위한 예인시물레이션 수치코드를 개발하였다. 초기설계단계에서 활용가능하도록 운동방정식에는 조종수학그룹(MMG)모델이 적용되었고 조종미계수에는 경험식이 적용되었다. 개발된 수치코드의 유효성을 확인하기 위해 발표된 계산 및 모형시험의 결과와 비교하였다. 개발된 수치코드를 이용하여 LNG 병커링 바지의 선미 스키프 유무에 따른 예인시물레이션을 수행하였다. 수행된 해석을 통해 설계된 스키프 면적의 적정성을 확인하였다.

2. 수학적모델 및 예인안정성 기준

2.1 수학적모델

본 연구에서는 LNG 병커링 바지의 예인안정성에 관한 수치해석을 수행하기 위하여 MMG모델 기반의 조종운동방정식을 고려하였다. 예인되는 LNG 병커링 바지의 운동은 전후, 좌우 그리고 선수동요 방향의 운동으로 구성된 평면운동으로 모사할 수 있으며 MMG 모델을 기초로 운동방정식을 식(1)-(3)과 같이 유도된다.

$$m(\dot{u} - vr) = X_{tow} + X_{hyd} \quad (1)$$

$$m(\dot{v} - ur) = Y_{tow} + Y_{hyd} \quad (2)$$

$$I_{zz}\dot{r} = N_{tow} + N_{hyd} \quad (3)$$

† 교신저자 : 정희원, carot541@kriso.re.kr

여기서 m 은 질량, I_{zz} 는 선수동요 질량관성모멘트를 의미한다. u , v 및 r 각각은 바지의 전후속도, 좌우속도 그리고 선수각 속도를 의미한다. X_{hyd} , Y_{hyd} 그리고 N_{hyd} 는 LNG 병커링 바지의 작용하는 힘으로 식(4)-(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$X_{hyd} = -X_{res} + (X_{vr} - Y_v)vr + X_u \dot{u} \quad (4)$$

$$Y_{hyd} = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + \frac{1}{2} \rho L d U^2 (Y_v' v' + Y_r' r' + Y_{v|v|} v' |v'| + Y_{v|r|} v' |r'| + Y_{r|r|} r' |r'|) \quad (5)$$

$$N_{hyd} = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + \frac{1}{2} \rho L^2 d U^2 (N_v' v' + N_r' r' + N_{r|r|} r' |r'| + N_{vvr} v' v' r' + N_{vrr} v' r' r') \quad (6)$$

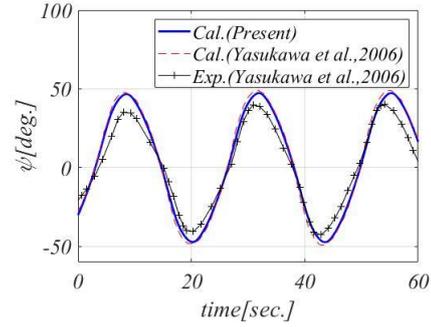
여기서 L 은 바지의 길이, d 는 바지의 흘수 그리고 U ($U = \sqrt{u^2 + v^2}$)는 바지의 속도를 의미한다. u' ($u' = u/L$), v' ($v' = v/L$) 및 r' ($r' = rU/L$)의 무차원화된 속도에 종속적으로 변하는 횡방향 및 선수각 방향의 유체력은 Inoue(1979a, 1979b)에 의해 개발된 조종 미계수를 정리한 Lee and Kim(1995)의 논문을 참조하였다. 식(5)-(6)의 Y_v , Y_r , N_v 과 N_r 은 slender body 이론을 통해 계산하였다. slender body 이론에 적용할 단면의 부가질량은 2차원 경계적분방정식방법을 이용하여 계산하였다. 그리고 X 방향 유체력 X_u 은 Motora(1960)의 추정식을 X_{vr} 은 Wagner and Chislett(1972)의 추정식을 이용하였다. 식 (4)의 X_{res} 는 정수 중 저항을 나타낸다. 식 (1)-(3)의 X_{tow} , Y_{tow} 그리고 N_{tow} 는 예인삭에 의한 예인력을 의미하며 단순 인장줄로 모델링하였다.

3. 수치코드 검증

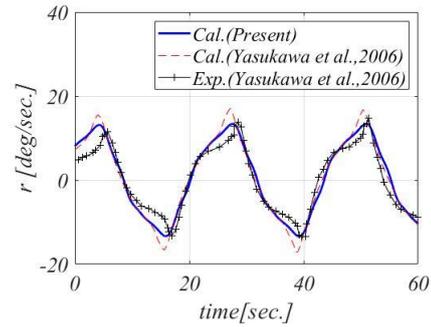
본 연구에서는 상기 수식을 기반으로 MATLAB 기반의 바지 평면의 예인 시뮬레이션을 수행할 수 있는 수치코드를 개발하였다. 수치코드의 유효성을 검증하기 위하여 Yasukawa et al.(2006)의 계산 및 시험의 결과와 비교하였다. 검증계산에 사용된 바지의 제원은 Table 1과 같다. 예인속도는 0.509m/s만을 고려하였다. 조종 미계수는 Yasukawa et al.(2006)에 제시된 값을 이용하였으며 제시된 조종미계수에 대응되도록 유체력 수식은 수정하여 계산하였다.

Table 1 Principal dimensions for Yasukawa's barge(Yasukawa et al., 2006)

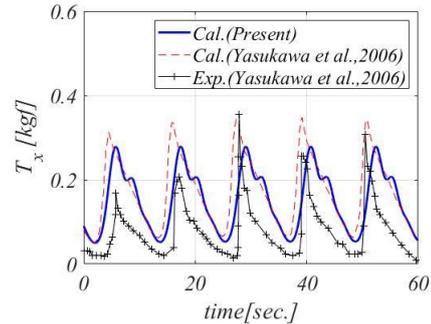
	2B w/o skeg
Length L(m)	1.219
Bredth B(m)	0.426
Bredth d(m)	0.0548



(a) Heading angle



(b) Yaw rate



(c) Towline tension

Fig. 1 Comparison of time histories for 2B without skeg

예인삭의 길이 역시 Yasukawa et al.(2006)와 같이 바지의 길이로 하였다. 예인삭의 물성치는 Nam et al.(2013)에 제시된 스프링상수(50N/m)와 감쇠계수(10N·s/m)를 참조하였다.

3.1 바지 2B의 예인해석

바지 2B의 예인해석을 수행하였다. 선수각 -20도의 offset으로 초기 조건을 설정하였으며 모형시험과 동일하게 60초로 수행하였다. 수행된 결과를 정리하여 Yasukawa et al.(2006)의 계산 및 모형시험 결과를 함께 Fig. 1에 비교하였다. 본 연구에서 개발된 코드로 수행된 계산의 결과와 Yasukawa et al.(2006)에서 수행된 계산 결과 모두 Yasukawa et al.(2006)의 모형시험과 비교하여 전반적으로 유사하나 다소 큰 진폭을 예측하였다. 예인삭에 발생

되는 장력 또한 개발된 코드와 Yasukawa et al.(2006)에서 수행된 계산 결과 모두 모형시험과 비교하여 최대값에서는 다소 차이가 있으나 유사한 경향성을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 수치모델이 Yasukawa et al.(2006)에 의해 수행된 계산과 모형시험과 비교하여 유사한 결과를 제공함을 확인하였으며 개발된 수치모델을 통하여 LNG 벙커링 바지의 예인안정성을 평가하였다.

4. LNG 벙커링 바지의 예인안정성 해석

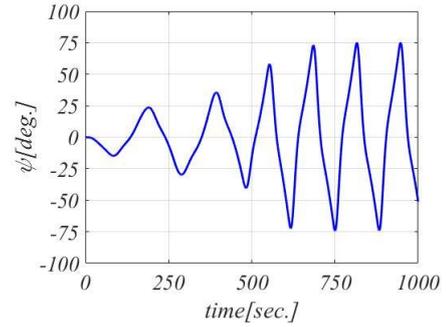
4.1 대상선 및 해석조건

본 연구에서는 설계가 진행 중인 LNG 벙커링 바지의 정수 중 예인시물레이션을 수행하였다. LNG 벙커링 바지의 주요제원은 Table 2에 나타내었다.

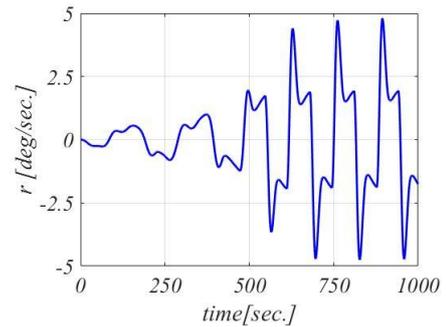
Table 2 Particulars of LNG bunkering barge

Item	Unit	Design condition
LBP	[m]	45.65
B	[m]	12.4
TF	[m]	2.5
TA	[m]	2.5
Displacement	[m ³]	1052.1
Wetted surface area	[m ²]	656.8
k _{yy}	[L]	0.25

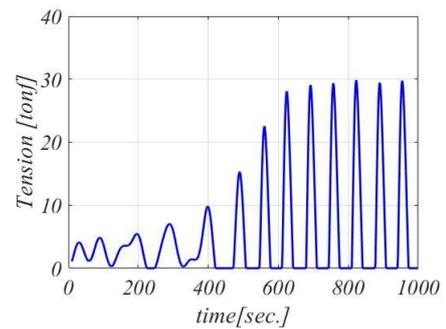
예인선속은 8 knot를 적용하였다. 예인해석을 위한 예인선의 길이는 선박안전법 제 23조 시행규칙 제 81조의 규정을 참조하여 선정하였다. LNG 벙커링 바지는 연해구역을 운항하기 때문에 예인선은 부선과 동일한 길이로 가정하면 182.6 m ((45.65+45.65)×2) 이상의 예인선을 확보해야 하며 계산에 편의를 위해 200m로 예인선의 길이를 설정하였다. 예인선의 재질은 64mm의 폴리프로필렌 합성수지 로프를 사용하였다. 본 예인선은 20% 신장시 파단되며 파단력은 49톤이다. 이를 이용하여 EA를 산출하면 약 2,403 kN이며 감쇠계수 C는 0으로 가정하였다. LNG 벙커링 바지의 정수 중 저항은 CFD 계산 결과를 활용하였다. CFD 계산은 상용코드인 STAR-CCM+를 이용하였고 계산은 실선 scale에서 수행되었다. 선속 별 저항을 통해 최소자승법을 통하여 선정하였다.



(a) Heading angle



(b) Yaw rate

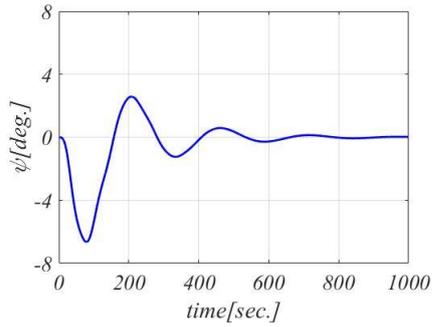


(c) Towline tension

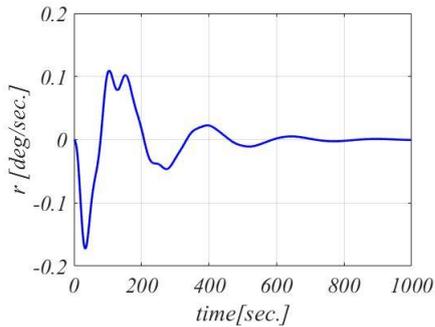
Fig. 2 Time histories for LNG bunkering barge(W/O skag)

4.2 Skag가 미부착된 LNG 벙커링 바지의 예인안정성 해석

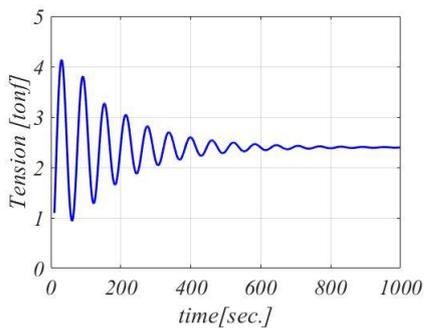
본 연구에서 예인안정성 해석은 초기 횡방향 offset(0m, 30m)에 대한 거동해석을 수행하였다. 해석 시간은 1000초를 수행하였다. 초기 offset으로 인하여 시간이 지남에 따라 변화하는 LNG 벙커링 바지의 선수동요, 각속도 그리고 예인장력의 시계열을 Fig. 2에 도시하였다. LNG 벙커링 바지의 선수동요가 시간이 지남에 따라 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 예인안정성이 불안정함을 나타내며 이러한 불안정성은 예인 바지의 선수동요와 좌우동요를 증가시켜 예인 바지의 운항 안정성에 악영향을 준다. 뿐만아니라 예인장력을 증가시켜 예인선의 파손 위험을 야기한다. 따라서 LNG 벙커링 바지의 예인안정성을 위한 적절한 면적의 선미스케그 확보가 필요하다.



(a) Heading angle



(b) Yaw rate



(c) Towline tension

Fig. 3 Time histories for LNG bunkering barge(W/ skeg)

4.3 Skeg가 부착된 LNG 병커링 바지의 예인안정성 해석

LNG 병커링 바지의 예인안정성 확보를 위해 선미 스케그를 면적을 4.357m^2 확보하였다. 선미 스케그의 효과는 핀(fin) 모델을 이용하여 조종 미계수에 반영할 수 있다. 본 연구에서는 Jacobs(1964)의 추정식을 반영하였다. 선미 스케그가 부착된 LNG 병커링 바지의 예인안정성 해석 또한 초기 횡방향 offset(0m, 30m)에 대하여 수행하였다. 시간이 지남에 따라 변화하는 선수동요, 각속도 그리고 예인장력의 시계열을 또한 Fig. 3에 도시하였다. 선미스케그가 부착된 LNG 병커링 바지의 선수동요는 시간이 지남에 따라 급격히 감소함을 알 수 있다. 이를 통해 선미 스케그로 인한 예인 안정성이 비약적으로 향상됨을 확인할 수 있다. 그리고 초기 offset으로 인하여 발생한 선수동요로 인한 예인 장력이 초기에 증가하였다가 예인 바지의 수평면 운동이 안정됨에 따라 감소함을 알 수 있다. 이는 예인삭의 파손의 위험성을 감소시킬뿐만 아니라 예인저항 감소로 인한 운영비용

도 감소시킬수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 LNG 병커링 바지에 대한 예인안정성을 평가하였다. 개발된 수치코드를 발표된 계산결과와 모형시험과 비교하여 유효성을 확인하였다. 개발된 수치코드를 이용하여 LNG 병커링 바지의 선미 스케그 유무에 따른 예인해석을 수행하였고 설계된 선미 스케그 면적 적정성을 확인하였다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 국가개발사업인 ‘연안선박 맞춤형 LNG병커링 시스템 개발’ (PMS4150)의 결과물임을 밝히는 바입니다.

참 고 문 헌

- [1] Inoue, S., Hirano, M., Hirakawa, Y., and Mukai, K.(1979a), "The hydrodynamic derivatives on ship manoeuvrability in even keel condition", Transactions of the WestJapan Society of Naval Architects, No. 57, pp. 13-19
- [2] Inoue, S., Hirano, M. and Mukai, K.(1979b), "The non-Linear terms of lateral force and moment acting on ship hull in the case of manoeuvring", Transactions of the WestJapan Society of Naval Architects, No. 58, pp.153-160.
- [3] Jacobs, W. R.(1963), "Method of Predicting Course Stability and Turning Qualities of Ships", Davidson Laboratory Report 945. Davidson Laboratory. New Jersey.
- [4] Lee, S. K and Kim, S. J.(1995), "Prediction of Maneuverability of a Ship in the Initial Design Stage", Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 32, No. 4, pp. 19-26.
- [5] Matora, S.(1960), "On the measurement of added mass and added moment of inertia of ships in steering motion", Proceedings of the First Symposium on Ship Maneuverability, David Taylor Model Basin Report 1461, Washington DC, pp. 241-274.
- [6] Nam, B. W., Park, J. Y., Hong, S. Y., Sung, H. G and Kim, J. W.(2013), "Numerical Simulation of Towing Stability of Barges in Calm Water", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 27, No. 1, pp. 67-73.
- [7] Wagner, S. L. and Chislett, M. S.(1972), "Xvr' for Models of a Fast Container Vessel and Two Large Tankers, Measured with a Planar Motion Mechanism-Materials for Manoeuvrability Committee Reports to 13 th ITTC'.
- [8] Yasukawa, H., Hiritaka, H., Nakamura, N. and Matsumoto, Y.(2006), "Simulation of Slewing Motion of a Towed Ship", Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 4, pp. 137-146.